

POSITION CONTROL SYSTEM FOR SCANNING TYPE PROBE MICROSCOPE

Patent Number: JP8201402
Publication date: 1996-08-09
Inventor(s): DOU TAKESHI
Applicant(s): OLYMPUS OPTICAL CO LTD
Requested Patent: ☐ JP8201402
Application Number: JP19950012472 19950130
Priority Number(s):
IPC Classification: G01N37/00; G01B21/30; H01J37/28
EC Classification:
Equivalents:

Abstract

PURPOSE: To improve the responsiveness and positioning accuracy of a position control system for scanning probe microscope by stabilizing a control system and, at the same time, to control the scanning voltage of a piezoelectric body so that the natural resonance frequency of the piezoelectric body can become flat to prevent the position control system from becoming more complicated and larger in size.

CONSTITUTION: Scanning signals inputted to a position control circuit from the outside are supplied to an integrating compensator 15 through a comparator 14. The output of the compensator 15 is supplied to a piezoelectric actuator 17 from an adder 20 through a high-voltage amplifier 16 and, at the same time, to a reference model section 21. The output of the actuator 17 is supplied to a comparator 22 together with the output of the reference section 21 and, at the same time, fed back to the comparator 14 through a displacement sensor 18. A correcting voltage V_a is inputted to the adder 20 from the comparator 22 through an adapting mechanism section 23. The scanning voltage added by the adder 20 is supplied to the actuator 17 as a control voltage V_p after the voltage is amplified by means of the amplifier 16.

Data supplied from the esp@cenet database - I2

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平8-201402

(43) 公開日 平成8年(1996)8月9日

(51) Int.Cl. ⁶	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
G 0 1 N 37/00		A		
G 0 1 B 21/30		Z		
H 0 1 J 37/28		Z		

審査請求 未請求 請求項の数 3 O L (全 15 頁)

(21) 出願番号 特願平7-12472

(22) 出願日 平成7年(1995)1月30日

(71) 出願人 000000376

オリンパス光学工業株式会社

東京都渋谷区幡ヶ谷2丁目43番2号

(72) 発明者 童 毅

東京都渋谷区幡ヶ谷2丁目43番2号 オリ
ンパス光学工業株式会社内

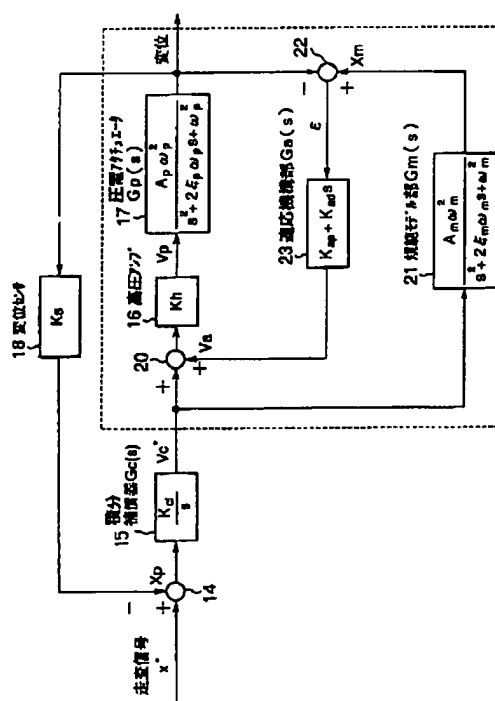
(74) 代理人 弁理士 鈴江 武彦

(54) 【発明の名称】 走査型プローブ顕微鏡の位置制御システム

(57) 【要約】

【目的】 この発明は、制御系を安定させて応答性を速めると共に、位置決め精度を高め、システムの複雑化や装置の大型化を避けるために、圧電体の固有共振周波数が平坦な特性となるべく演算して該圧電体の走査電圧を制御する。

【構成】 位置制御回路の外部からの走査信号が、比較器14を介して積分補償器15に入力される。この積分補償器15の出力は、加算器20から高圧アンプ16を介して圧電アクチュエータ17に供給されると共に、規範モデル部21に供給される。圧電アクチュエータ17の出力は、上記規範モデル部21の出力と共に比較器22に供給されると共に、変位センサ18を介して比較器14にフィードバックされる。また、比較器22からは適応機構部23を経て、補正電圧 V_a が加算器20に入力される。加算器20で加算された走査電圧は、高圧アンプ16で増幅されて、制御電圧 V_p として圧電アクチュエータ17に供給される。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 圧電体を用いた走査型プローブ顕微鏡の位置制御システムに於いて、

上記圧電体に入力される走査電圧に基いて上記圧電体の固有共振周波数が平坦な特性となるべく変位を演算する第1の演算手段と、

この第1の演算手段で演算された変位と上記圧電体の変位出力とを比較して誤差を求める比較手段と、

この比較手段で求められた上記誤差に基いて補正電圧を演算する第2の演算手段と、

この第2の演算手段で演算された補正電圧と上記入力電圧とを加算して上記圧電体に制御電圧を供給する加算手段とを具備することを特徴とする走査型プローブ顕微鏡の位置制御システム。

【請求項2】 上記第1の演算手段は、上記圧電体の固有共振周波数を予め設定された所定の周波数特性とするためにローパスフィルタを用いて演算することとを特徴とする請求項1に記載の走査型プローブ顕微鏡の位置制御システム。

【請求項3】 上記第2の演算手段は、上記圧電体の実際変位が上記第1の演算手段の出力に追従するように上記誤差に基いて比例微分ゲインを選択して補正電圧を演算することとを特徴とする請求項1若しくは2に記載の走査型プローブ顕微鏡装置の位置制御システム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】 この発明は走査型プローブ顕微鏡の位置制御システムに関し、より詳細には圧電体の固有共振周波数 ω_p に於いて平坦な特性を有する圧電体の規範モデルを利用した走査型プローブ顕微鏡の位置制御システムに関するものである。

【0002】

【従来の技術】 一般に、走査型プローブ顕微鏡は、トンネル電流を利用して試料表面を原子寸度でなぞって画像化する走査トンネル顕微鏡STM (Scanning Tunneling Microscope) を初めとして、多様化している探針と近接させ、その間に働く物理量を検出し、それを媒体にして試料表面の凹凸をなぞり、試料表面の性質の違いを知*

$$x^*$$

$$\dots (1)$$

【0009】

※ ※【数2】

$$y^*$$

$$\dots (2)$$

【0010】 そして、このXY位置制御回路3とZ変位サーボ制御部4から、下記(3)式、(4)式及び(5)式で表されるX制御信号(X方向の圧電体の駆動電圧)、Y制御信号(Y方向の圧電体の駆動電圧)及び★

$$V_{x^*}$$

$$\dots (3)$$

【0012】

50 【数4】

*る原子サイズオーダーで三次元的な測定装置である。

【0003】 また、原子間力顕微鏡(AFM: Atomic force Microscope)は、上述したSTMに類似しており、走査型プローブの顕微鏡の1つとして位置付けられている。AFMでは、自由端に鋭い探針を有するカンチレバーが、試料に対抗・近接して設けられている。そして、こうしたAFMでは、該深針の先端の原子と試料原子との間に働く相互作用力により、変位するカンチレバーの動きを電気的或いは光学的に捕らえて測定しつつ、
10 試料をXY方向に走査し、カンチレバーの探針部との位置関係を相対的に変化させることによって、試料の凹凸情報等を原子サイズオーダーで三次元的に捕らえることができる。

【0004】 更に、上記AFMは $10^{-18} \sim 10^{-10}$ N程度の微弱な力で動作するため、AFMを用いて材料のナニュートンオーダーでの加工及びメモリ操作が可能である。例えば、1990年にA. L. Weisenhornらは、AFMを用いてゼオライト表面に“X”の文字を書いていた。

【0005】 このように、原子レベルでの試料表面の加工、材料の摩耗の測定といった表面修飾の場合には、STM及びAFMは原子・分子のマニピュレータとして使用が可能となってくる。

【0006】 走査型プローブ顕微鏡に於いては、圧電体アクチュエータの共振特性による画像品質の劣化を防止するために、高速で且つ高精度の位置制御技術の開発が要求されている。したがって、その基本となるミクロン及びナノメートルオーダーの位置制御系の精度を高めるのは、重要な課題の1つとなっている。

【0007】 図8は、従来の走査型プローブ顕微鏡の構成の一例を示した図である。同図に於いて、円筒型圧電体を用いた圧電アクチュエータ1及びX、Y位置指令部2からは、XY位置制御回路3に対して、下記(1)式、(2)式で表される走査信号と、実際変位の x_p 、 y_p が出力される。

【0008】

【数1】

★Z制御信号(Z方向の圧電体の駆動電圧)が、上記圧電アクチュエータ1に出力される。

【0011】

【数3】

$$V_y^*$$

$$\dots (4)$$

【0013】

* * 【数5】

$$V_z^*$$

$$\dots (5)$$

【0014】圧電アクチュエータ1の内部には、その圧電体の上端にX、Y方向の変位を測定するためのミラー5が取付けられ、略中央部にレーザ光を集光するレンズ6が設けられている。また、圧電アクチュエータ1は、その下端がX変位センサ7及びY変位センサ8を有するユニットに固定されている。上記X変位センサ7及びY変位センサ8は、試料台9の2次元方向の移動量を検出するためのセンサであり、その詳細は、例えば特開平6-229753号公報のスキャンシステムに記載されているので、ここでは説明を省略する。

【0015】一方、圧電アクチュエータ1の上端には、試料10を保持する試料台9が設置されている。そして、その先端部にカンチレバー11を有するプローブ変位検出部12によって、カンチレバー11の変位は光学的及び電氣的に検出される。上記プローブ変位検出部12からは、変位信号S1がZ変位サーボ制御部4へ出力される。

【0016】Z変位サーボ制御部4は、カンチレバー11の変位を一定に保持するようにフィードバック制御し、圧電アクチュエータ1をZ方向に伸縮させるZ制御信号、すなわち試料凹凸情報をSPM像表示装置13に出力する。このSPM像表示装置13は、転送された測定データを格納し、画像形成するものである。

【0017】尚、図中のXはX方向の位置、YはY方向の位置、ZはZ方向の位置を表している。図9は、図8に示される従来の圧電アクチュエータ1のXY走査フィードバック制御系の構成を示すブロック図である。尚、ここでは、X走査フィードバック制御系のみ記すが、Y走査フィードバック制御系についても同様である。

【0018】図9に於いて、上記(1)式で示される走査信号と実際変位 x_p が比較器14に入力され、その出力が積分(I)補償器15に供給される。この積分補償器15の出力は、高圧アンプ16を介して圧電体を用いた圧電アクチュエータ17に供給される。圧電アクチュエータ17の出力は実際の変位であり、これが変位センサ18を介して比較器14に変位 x_s として供給される。

【0019】ここで、積分補償器15に示されている K_{ci}/s は、積分ゲインをラプラス変換のS領域で割ったもので、積分制御の一般式である。また、圧電アクチュエータ17に示されている式は、圧電体から成るチューブスキャナの変位モデルを関数化して示したものである。

【0020】このように構成されたXY走査フィードバック制御系は、圧電アクチュエータ1のヒステリシスや

スクープ等の非線形特性が位置制御の精度に与える影響を除去するために、図8に示されるようなX、Y変位センサ7、8とフィードバック制御回路(XY位置制御回路3)を設け、実際変位 x_p 、 y_p が(1)式及び(2)式で表される走査信号に追従するようにフィードバック制御する。

【0021】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、図10に示される円筒型の圧電アクチュエータのX方向に実測した周波数特性からわかるように、圧電アクチュエータの振動は1900Hzに於いてピークが現れている。この場合、ダンピング係数 ζ ($=0.0169$)は、振動しない場合の理想値である0.7に比べてかなり小さい値であり、円筒型圧電アクチュエータは減衰性が悪い機械振動系であることがわかる。

【0022】また、図9に示される走査型プローブ顕微鏡の位置制御方式では、圧電体の位置をフィードバックする閉ループ制御系として構成されることが普通である。このとき、圧電体の共振特性が制御ループに入ることには注意しなければならない。

【0023】ところで、制御系は、ピーク値が0dBを越えようと不安定になってしまう。したがって、図10に示されるような、減衰性が悪い機械振動系に対して、従来の位置制御系は、圧電アクチュエータの振動を起こしやすいものであった。このため、従来は積分補償器にて積分ゲイン K_{ci} を操作することによって、圧電アクチュエータの振動のピーク値が0dBを越えないように制御していた。

【0024】XY変位センサを有する従来の走査型プローブ顕微鏡の走査制御系では、図11(a)に示される1Hzの走査速度で走査信号に対して、同図(b)に示される応答信号が追従している。しかしながら、走査速度が10Hzと速くなると、図12(a)及び(b)に示されるように、走査の折り返す時点で圧電体が走査指令信号に追従しなくなる。加えて、追従誤差は折り返しの速度に比例するため、走査速度が速くなる程、追従誤差は大きくなってしまふものであった。

【0025】また、XY走査制御系の位置決め精度向上は、圧電体の高い剛性及び制御系の高ゲイン化によって達成することができると考えられる。しかしながら、全ての機械材料が有限の質量と剛性を有する限り、固有振動数の増大には限界がある。更に、制御系ゲインの増大と共に、振動特性はますます安定性を失ってしまう。

【0026】図13(a)は、従来の積分ゲイン $K_{ci}=250$ の時のステップ応答特性を示した図である。この

積分ゲインでは、立上がり安定するまで約25 msecを要している。積分ゲイン K_{ei} が500以上になると、図13(b)に示されるように、ステップ応答は速くなる(約15 msec)ものの、制御系が不安定になり、ついには発振して制御が不可能になってしまう。したがって、SPMの最大走査速度が圧電体のXY方向の振動特性によって制限される。

【0027】圧電体の振動特性を抑制するために、例えば特開昭63-189911号公報には、加速度センサを使用して加速度信号1次遅れ回路に入力し、その速度信号を印加電圧指令に加算する構成の制御手段が記載されている。しかしながら、この方法では、加速度センサが必要になると共に処理回路を必要とするので、システムの複雑化、装置の大型化は避けられないものであった。

【0028】この発明は上記課題に鑑みてなされたもので、制御系を安定させて応答性を速めると共に、システムの複雑化や装置の大型化を招くことのない走査型プローブ顕微鏡の位置制御システムを提供することを目的とする。

【0029】

【課題を解決するための手段】すなわちこの発明は、圧電体を用いた走査型プローブ顕微鏡の位置制御システムに於いて、上記圧電体に入力される走査電圧に基いて上記圧電体の固有共振周波数が平坦な特性となるべく変位を演算する第1の演算手段と、この第1の演算手段で演算された変位と上記圧電体の変位出力とを比較して誤差を求める比較手段と、この比較手段で求められた上記誤差に基いて補正電圧を演算する第2の演算手段と、この第2の演算手段で演算された補正電圧と上記入力電圧とを加算して上記圧電体に制御電圧を供給する加算手段とを具備することを特徴とする。

【0030】

【作用】この発明にあっては、圧電体アクチュエータを用いた走査型プローブ顕微鏡のXY走査制御系にて、従来の走査制御系に圧電体の固有共振周波数 ω_p に於いて平坦な周波数特性を有するような伝達関数 $G_a(s)$ の規範モデル部によって、圧電アクチュエータの伝達関数 $G_p(s)$ の振動極点を移動させ、圧電アクチュエータ*

$$V_c^{\frac{1}{2}}$$

【0036】適応機構部23では、規範モデル部21の位置 X_m と圧電アクチュエータ17の実際変位 x 、との位置偏差が適当に増幅されて、補正電圧 V_a が計算される。そして、ここで計算された補正電圧 V_a が、(6)式の走査電圧に加算される。

【0037】したがって、圧電アクチュエータ17の変位 x が規範モデル部21の出力 X_m に追従するように、適応機構部23によって、制御入力(補正電圧) V_a を発生させる。圧電アクチュエータ17の伝達関数 G

*の共振ピークを平坦な特性に従って抑制して、制御系の速応性及び安定性を高める。これによって、減衰性の悪い機械振動系を安定化することができ、更にこれにより、位置制御ループのゲインを高く設定することができ、位置制御系の応答を速くすると共に精度を高めることができる。こうして、積分補償器を用いた位置制御系で走査速度を上げられないという問題を解決し、圧電体をXY2次元方向に高速移動することができる。

【0031】

【実施例】以下、図面を参照してこの発明の実施例を説明する。図1は、この発明の走査型プローブ顕微鏡の位置制御システムによる位置制御系の構成を示すブロック図である。走査型プローブ顕微鏡の構成については、図8に示されるものと同様であるので、ここでは説明を省略する。尚、ここではX走査フィードバック制御系のみ記すが、Y走査フィードバック制御系についても同様である。

【0032】図1に於いて、この位置制御系は、適応機構部と適応モデルによる追従制御部とから構成される。同図の破線内が追従制御部である。位置制御回路の外部より供給される上記(1)式に示される走査信号は、比較器14を介して積分補償器15に入力される。この積分補償器15の出力は、加算器20から高圧アンプ16を介して圧電アクチュエータ17に供給されると共に、規範モデル部21に供給される。

【0033】圧電アクチュエータ17の出力は変位出力であり、上記規範モデル部21の出力と共に比較器22に供給されると共に、変位センサ18を介して比較器14にフィードバックされる。また、比較器22からは適応機構部23を経て、補正電圧 V_a が加算器20に入力される。

【0034】追従制御部では、積分補償器15から下記(6)式に表される走査電圧が入力されて、規範モデルとしての変位 X_m 、すなわち、振動や外乱といった外乱的な要素の影響を受けない変位が、規範モデル部21にて計算される。

【0035】

【数6】

$$\dots (6)$$

$p(s)$ が規範モデル部21の伝達関数 $G_m(s)$ と完全に一致していれば、 $V_a=0$ となり、図9に示されるような従来の制御系と等価になることがわかる。

【0038】具体的には、(1)式の走査信号が、変位センサ18によって検出された圧電アクチュエータ17の変位と比較され、その比較結果の誤差が積分補償器15で演算される。これにより、圧電アクチュエータ17に印加される(6)式の走査電圧が生成される。

【0039】この(6)式の走査電圧は、規範モデル部

7

21に入力される。そして、規範モデル部21からの出力 X_m と、圧電アクチュエータ17の実際変位 x_p が、比較器22にて比較される。この比較器22で比較された結果の誤差 ε が、適応機構部23であるPD補償器で補正されることにより補正電圧 V_a が生成される。こうして、補正電圧 V_a が加算器20にて、走査電圧に加算される。その後、高圧アンプ16で増幅されて、制御電圧 V_p として圧電アクチュエータ17に供給される。 *

$$G_c(s) \cdot G_p(s) = \frac{K_{ci} A_p \omega_p^2}{s(s^2 + 2\zeta_p \omega_p s + \omega_p^2)} \quad \dots (7)$$

【0042】図2は、従来の制御系の積分ゲイン K_{ci} に対する閉ループの極の変化を示す根軌跡を表した図である。同図に於いて、×印は極を表している。圧電アクチュエータ（圧電体）17のダンピング係数が $\zeta_p < 1$ で※

$$\begin{aligned} p_2 &= \omega_p \{-\zeta_p + j\sqrt{1 - \zeta_p^2}\} \\ p_3 &= \omega_p \{-\zeta_p - j\sqrt{1 - \zeta_p^2}\} \end{aligned} \quad \dots (8)$$

【0044】図2に示されるように、振動極 p_2 、 p_3 より出発する根軌跡は、ゲイン K_{ci} の増大と共に、同図に示されるように、虚軸の左側半面から虚軸の右側に入る。故に、図13(b)に示されるステップ応答特性のように、制御系が不安定となる。したがって、実用には、 K_{ci} を限界ゲイン $K_{lim} = 500$ より小さな値で利用しなくてはならない。

【0045】このように、従来の走査型プローブ顕微鏡の位置制御系では、減衰性の悪い振動系の場合閉ループのゲインを大きくすることができないため、閉ループの応答が悪くなる。そのため、走査速度が速くなると圧電体が折り返す点で走査信号に追従できなくなるものであった。また、試料台及び試料の重さの増加に伴って圧電体の共振点が低い方にシフトするため、制御ゲインを更★

$$G_c(s) = \frac{K_{ci}}{s} \quad \dots (9)$$

$$G_a(s) = K_{ap} + K_{ad}s \quad \dots (10)$$

$$G_p(s) = \frac{K_p \omega_p^2}{s^2 + 2\zeta_p \omega_p s + \omega_p^2} \quad \dots (11)$$

$$G_m(s) = \frac{K_m \omega_m^2}{s^2 + 2\zeta_m \omega_m s + \omega_m^2} \quad \dots (12)$$

ここで、 K_{ci} は積分補償器15の積分ゲイン、 K_h は高圧アンプ16のゲイン、 K_{ap} 、 K_{ad} は適応機構部23の比例・微分ゲイン、 A_p 、 ζ_p 、 ω_p は圧電アクチュエータ17のパラメータ、 A_m 、 ζ_m 、 ω_m は規範モデル部21のパラメータを表している。

【0048】上記適応機構部23には、上記(9)式の比例微分補償器を使用する。圧電体の規範モデル部21には、上記(12)式で表されるように、2次ローパスフィルタが用いられる。

8

*【0040】ここで、従来の積分補償器を用いた位置制御と、この発明による位置制御の違いを説明する。図9に示されるような、従来の一般的な積分補償器を用いた位置制御の場合、制御系のループの伝達関数は次のようになる。

【0041】

【数7】

※あるため、一組共役複素根は下記(8)式のようになる。

【0043】

【数8】

20★に下げなければならない。そのため、追従性が更に悪くなる。

【0046】一方、この発明による位置制御の抑制効果は、次の通りである。図1に示される制御系に於いて、 $G_c(s)$ を積分補償器15の伝達関数、 $G_p(s)$ を圧電アクチュエータ17の伝達関数、 $G_m(s)$ を規範モデル部21の伝達関数、 $G_a(s)$ を適応機構部23の伝達関数とする。すると、積分補償器15、圧電アクチュエータ17、規範モデル部21及び適応機構部23の各々の伝達関数は、下記(9)～(12)式のようになる。

【0047】

【数9】

【0049】図1からわかるように、この発明による位置制御系は、従来の位置制御系に規範モデル部21と比例微分補償器（適応機構部23）だけを追加したものである。これら規範モデル部21と適応機構部23がなければ、図9に示されるような従来のフィードバック制御系と同じである。同実施例によるXY走査制御系の開ループの伝達関数は、下記(13)式のようにして得られる。

50 【0050】

【数10】

$$G(s) = \frac{A_p \omega_p^2 K_{ci} [s^2 + (2\zeta_m \omega_m + A_m K_{ad} \omega_m^2) s + (\omega_m^2 + A_m K_{ap} \omega_m^2)]}{s(s^2 + 2\zeta_m \omega_m s + \omega_m^2) [s^2 + (2\zeta_p \omega_p + A_p K_{ad} \omega_p^2) s + (\omega_p^2 + A_p K_{ad} \omega_p^2)]} \quad \dots (13)$$

【0051】制御系の特性を表す上記(13)式の中には、機械定数として ζ_m 、 ω_m 、ゲイン K_{ip} 、 K_{id} が用いられているため、上式を用いて圧電体とする適応追従モデル制御の動作を検討することができる。

【0052】上記(13)式に於いて、 $K_{ip}=0$ 、 $K_{id}=0$ とすると、上記(7)式と全く同じ式が得られる。本来、ダンピングの悪い機械系であっても、同実施例のような制御系を付加し、適応機構部の比例微分ゲイン K_{ip} 、 K_{id} を適当に選択することにより、系のダンピングは改善される。

【0053】このように、同実施例で示されたような制御系を追加すると、開ループの伝達関数は(7)式から(13)式に変化する。この伝達関数の極を調べることで、この系のダンピングや応答を推察することができる。

【0054】ここで、図10に示されるような、ダンピング係数 $\zeta_m=0.016$ 、固有共振周波数 $\omega_m=11938$ [rad/s]、パラメータ $A_p=0.04$ の定数を有した圧電体を考える。この圧電体は、非常にダンピングの悪い系である。この圧電体に、上述した実施例による制御系を適用した場合には、適応機構部のゲイン K_{ip} 、 K_{id} は、上記(13)式の根軌跡を調べることで、より決定することができる。

【0055】図3は、 $K_{ip}=100$ 、 $K_{id}=1$ をパラメータとして描いた開ループの根軌跡を表したものである。同図より、適応機構部23のゲイン K_{ip} 、 K_{id} を適当に選択することにより、圧電体の振動極が、それぞれ図示AからB点、A'からB'点へ、図中実線で示されるように移動されることがわかる。その結果、系のダンピング係数 ζ が0.016から0.707に改善される。しかも、図3に示されるように、積分ゲイン K_i の限界 K_{lim} が、従来の制御系の500から4000になる。

【0056】すなわち、従来制御系の微分ゲインの選択範囲の根軌跡曲線上のA(A')点からC(C')点までの距離に対して、同実施例の制御法の積分ゲインの選択範囲は、根軌跡曲線上のB(B')点からC(C')点まで拡大された。

【0057】また、このように構成することによって、圧電アクチュエータ17の伝達関数 $G_p(s)$ の振動極点を移動させ、図4に破線で示されるような円筒型圧電アクチュエータの共振ピークを、同図に実線で示されるような平坦な特性を有する規範モデル部に従って抑制して、制御系の速応性及び安定性を高めることができる。

【0058】図5は、上述した実施例による制御系の10Hz三角波走査信号の応答特性を示した図である。図11に示される従来の制御系の応答特性図と比べ、圧電体が走査信号に完全に追従しているのがわかる。

【0059】更に、図6は、同実施例による制御系の50Hz三角波走査信号の応答特性図である。同図から明らかなように、50Hz三角波が走査しても、良好な追従特性を示している。その結果、高速走査が可能であることがわかる。

【0060】また、図7は、同実施例による制御系のステップ応答特性図である。図13に示される従来の制御系の応答特性図と比べ、立上がり時間が大幅に短くなっているのがわかる。

【0061】ところで、この発明による制御系を付加していない従来の走査型プローブ顕微鏡の位置制御系は、 $\zeta_m=0.016$ とダンピング係数が非常に悪いため、制御ゲインを高めると制御系の振動は発生する恐れがある。この振動の振幅は、位置制御系の応答を速くする(ゲイン K_{ci} を大きくする)ほど大きくなり、測定に悪い影響を及ぼすため、高速走査は望めない。したがって、上述した制御系を適用すれば、ダンピング係数は大幅に改善され、且つ制御ゲインも大きくすることができるため、振動を抑制することが可能となる。

【0062】このように、圧電体のダンピング係数 ζ_m と固有共振周波数 ω_m が既知の場合には、規範モデル部及び適応機構部のゲイン K_{ip} 、 K_{id} を適切に選択することができ、共振振動の抑制も大きな効果を発揮することができる。

【0063】尚、この発明による走査型プローブ顕微鏡の位置制御システムでは、規範モデル部としては単なる低次ローパスフィルタ、例えば2次ローパスフィルタで構成し、適応機構部としては比例、微分制御というように非常に簡単に構成することができ、特別な検出器を用いることがないため、従来マイクロコンピュータを用いて単なるフィードバックによる積分制御を行っていた位置制御システムに対しても、僅かなソフトウェアを追加するだけで容易に適用できるため、実用性の高いものである。

【0064】このように、走査型プローブ顕微鏡のXY走査位置制御システムに対し、上述した制御系を適用すると、次のような効果がある。

(i) 圧電体の共振振動を抑制し、制御系の速応性及び安定性を高める。

(ii) 走査型プローブ顕微鏡では、従来の

フィードバック制御で走査ラインの折返す点での追従特性の悪化による2次元方向に走査速度を上げられないという問題を解決する。

【0066】上記に示したこの発明の制御系は、走査型プローブ顕微鏡のXY走査制御に用いたが、Z方向のサーボ制御にも用いることが可能であるのは勿論である。また、上記に示した走査型プローブ顕微鏡として用いたが、半導体製造に於ける露光装置の位置決め装置にもこの発明が適用可能であるのは勿論である。

【0067】尚、この発明の上記実施態様によれば、以下の如き構成が得られる。

(1) 圧電体を用いた走査型プローブ顕微鏡の位置制御システムに於いて、上記圧電体に入力される走査電圧に基いて上記圧電体の固有共振周波数が平坦な特性となるべく変位を演算する第1の演算手段と、この第1の演算手段で演算された変位と上記圧電体の変位出力とを比較して誤差を求める比較手段と、この比較手段で求められた上記誤差に基いて補正電圧を演算する第2の演算手段と、この第2の演算手段で演算された補正電圧と上記入力電圧とを加算して上記圧電体に制御電圧を供給する加算手段とを具備することを特徴とする走査型プローブ顕微鏡の位置制御システム。

【0068】(2) 上記第1の演算手段は、上記圧電体の固有共振周波数を予め設定された所定の周波数特性とするためにローパスフィルタを用いて演算することとを特徴とする上記(1)に記載の走査型プローブ顕微鏡の位置制御システム。

【0069】(3) 上記第2の演算手段は、上記圧電体の実際変位が上記第1の演算手段の出力に追従するように上記誤差に基いて比例微分ゲインを選択して補正電圧を演算することとを特徴とする上記(1)若しくは(2)に記載の走査型プローブ顕微鏡装置の位置制御システム。

【0070】上記(1)の構成によれば、減衰性の悪い機械振動系を安定化することができ、圧電体を2次元方向に高速走査することができる。上記(2)の構成によれば、単なる低次ローパスフィルタで構成できるため、システム全体を簡単な構成で実現することができる。上記(3)の構成によれば、比例、微分制御というように非常に簡単に構成でき、特別な検出器も不要なため、マイクロコンピュータを用いて単なるフィードバックによる積分制御を行っていた位置制御システムに対しても、わずかなソフトウェアを追加するだけで容易に適用できる。

【0071】

【発明の効果】以上のようにこの発明によれば、制御系を安定させて応答性を速めると共に、位置決め精度を高め、システムの複雑化や装置の大型化を招くことのない走査型プローブ顕微鏡の位置制御システムを提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】この発明の走査型プローブ顕微鏡の位置制御システムによる位置制御系の構成を示すブロック図である。

【図2】従来の制御系の積分ゲイン K_{i1} に対する閉ループの極の変化を示す根軌跡を表した図である。

【図3】この発明に於いて、 $K_{i0}=100$ 、 $K_{i1}=1$ をパラメータとして描いた閉ループの根軌跡を表した図である。

【図4】円筒型圧電アクチュエータのX方向の周波数特性(破線)と規範モデル部の周波数特性(実線)とを比較した図である。

【図5】図1の走査型プローブ顕微鏡の走査制御系の10Hz三角波走査信号の応答特性を示すタイミングチャートで、(a)は走査信号の波形図、(b)は応答信号の波形図である。

【図6】図1の走査型プローブ顕微鏡の走査制御系の50Hz三角波走査信号の応答特性を示すタイミングチャートで、(a)は走査信号の波形図、(b)は応答信号の波形図である。

【図7】同実施例による制御系のステップ応答特性図である。

【図8】従来の走査型プローブ顕微鏡の構成の一例を示した図である。

【図9】図8に示される従来の圧電アクチュエータ1のXY走査フィードバック制御系の構成を示すブロック線図である。

【図10】円筒型圧電アクチュエータのX方向の周波数特性図である。

【図11】XY変位センサを有する従来の走査型プローブ顕微鏡の走査制御系の1Hz三角波走査信号の応答特性を示すタイミングチャートで、(a)は走査信号の波形図、(b)は応答信号の波形図である。

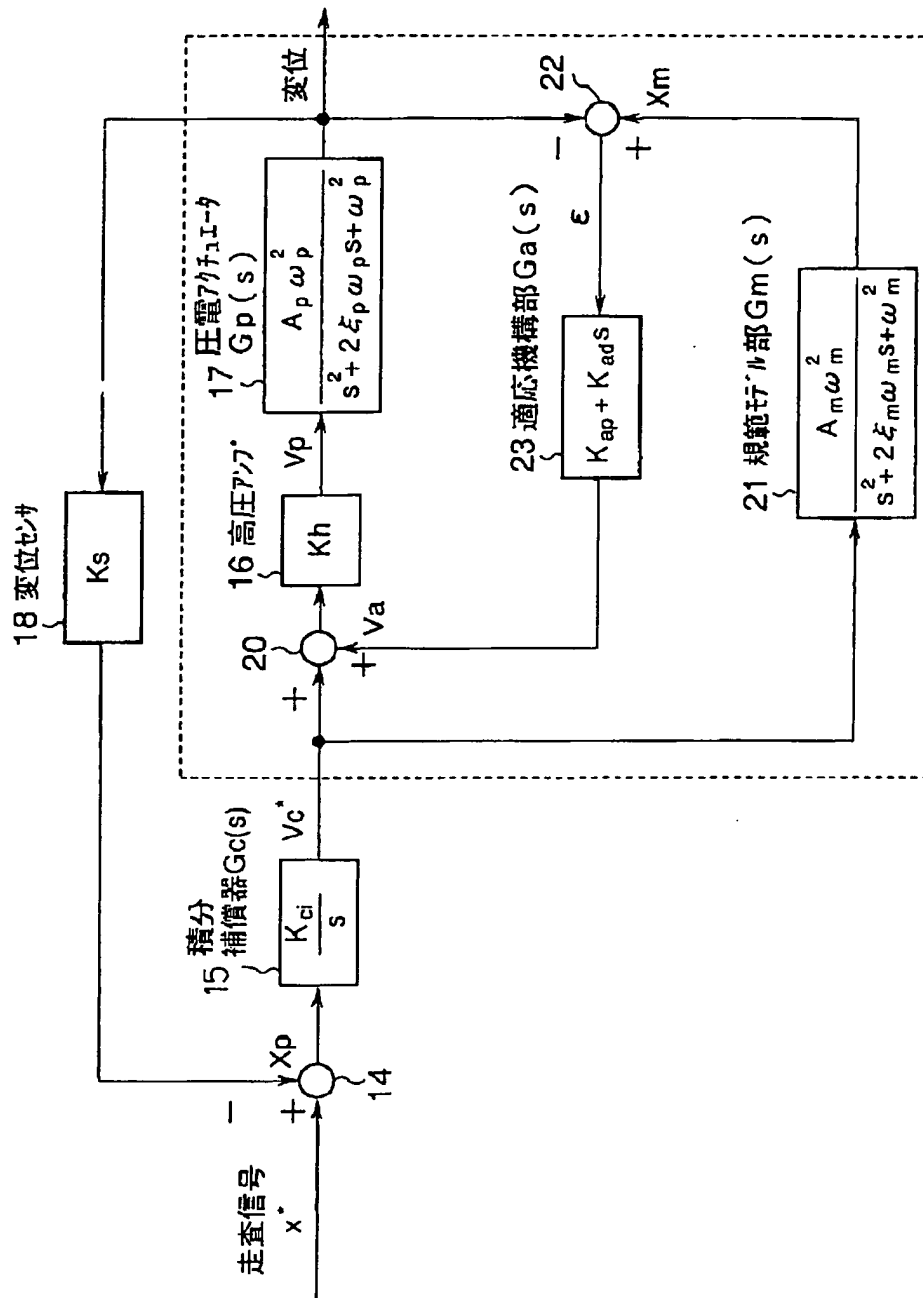
【図12】XY変位センサを有する従来の走査型プローブ顕微鏡の走査制御系の10Hz三角波走査信号の応答特性を示すタイミングチャートで、(a)は走査信号の波形図、(b)は応答信号の波形図である。

【図13】(a)は従来の積分ゲイン $K_{i1}=250$ の時のステップ応答特性図、(b)は積分ゲイン K_{i1} が500以上の時のステップ応答特性図である。

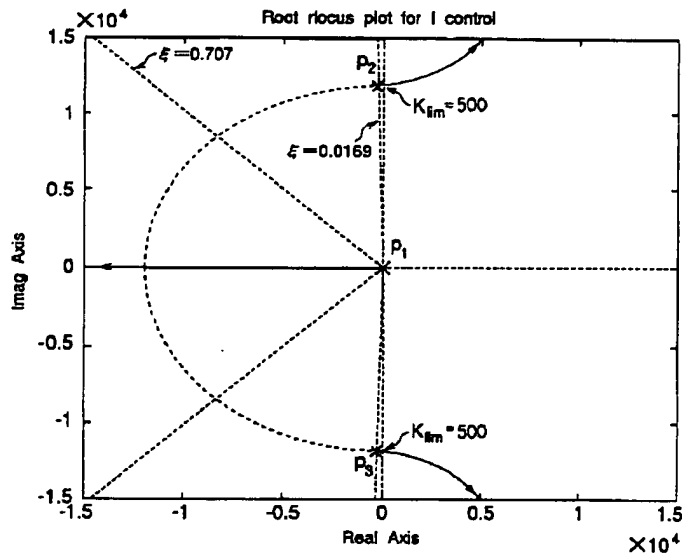
【符号の説明】

1、17…圧電アクチュエータ、2…X、Y位置指令部、3…XY位置制御回路、4…Z変位サーボ制御部、5…ミラー、6…レンズ、7…X変位センサ8…Y変位センサ、9…試料台、10…試料、11…カンチレバー、12…プローブ変位検出部、13…SPM像表示装置、14、22…比較器、15…積分(I)補償器、16…高圧アンプ、18…変位センサ、20…加算器、21…規範モデル部、23…適応機構部。

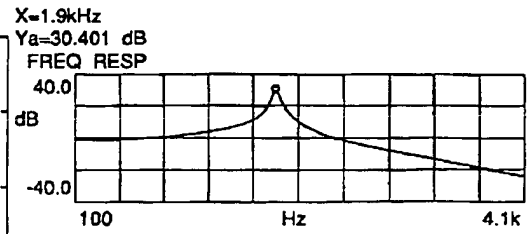
【図1】



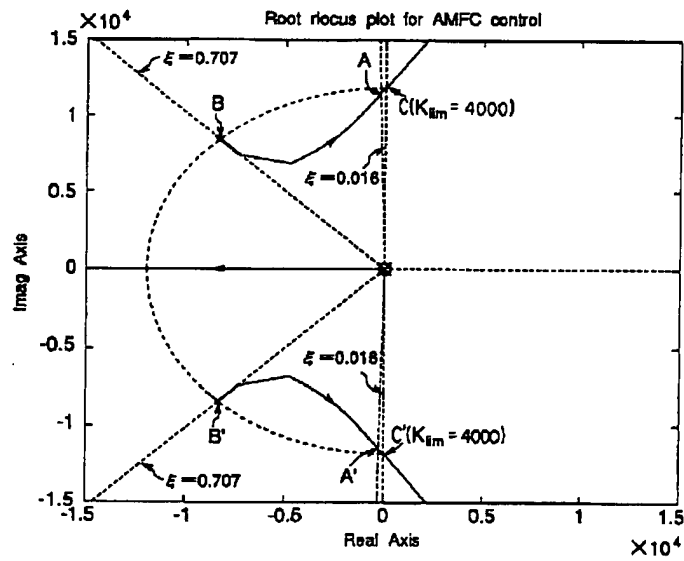
【図2】



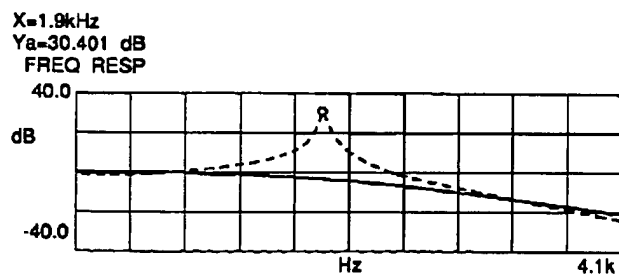
【図10】



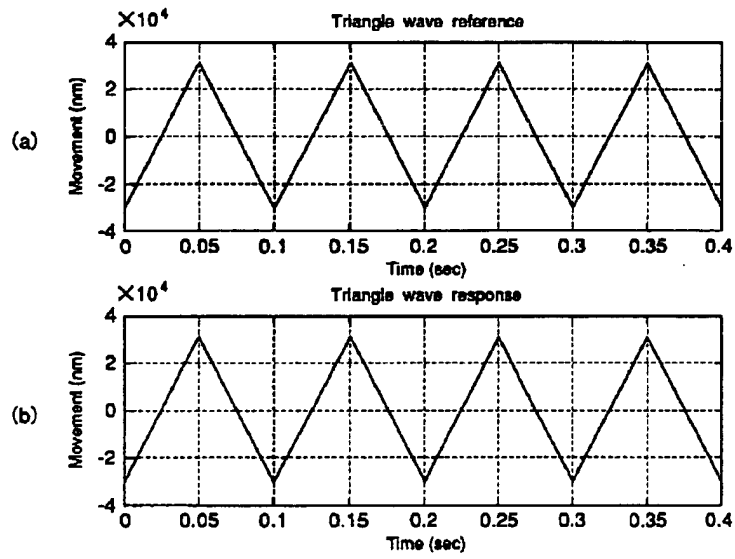
【図3】



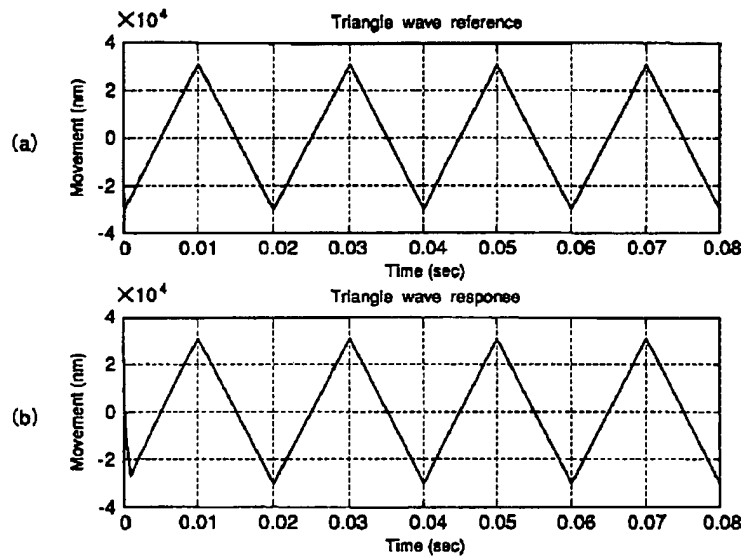
【図4】



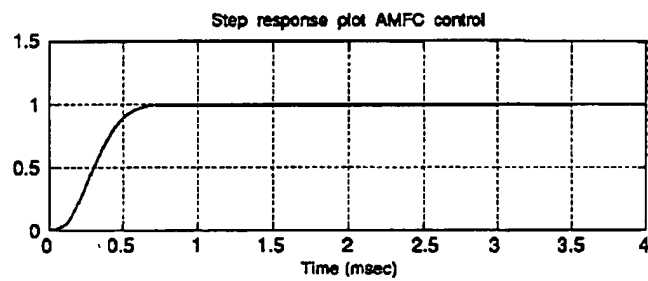
【図5】



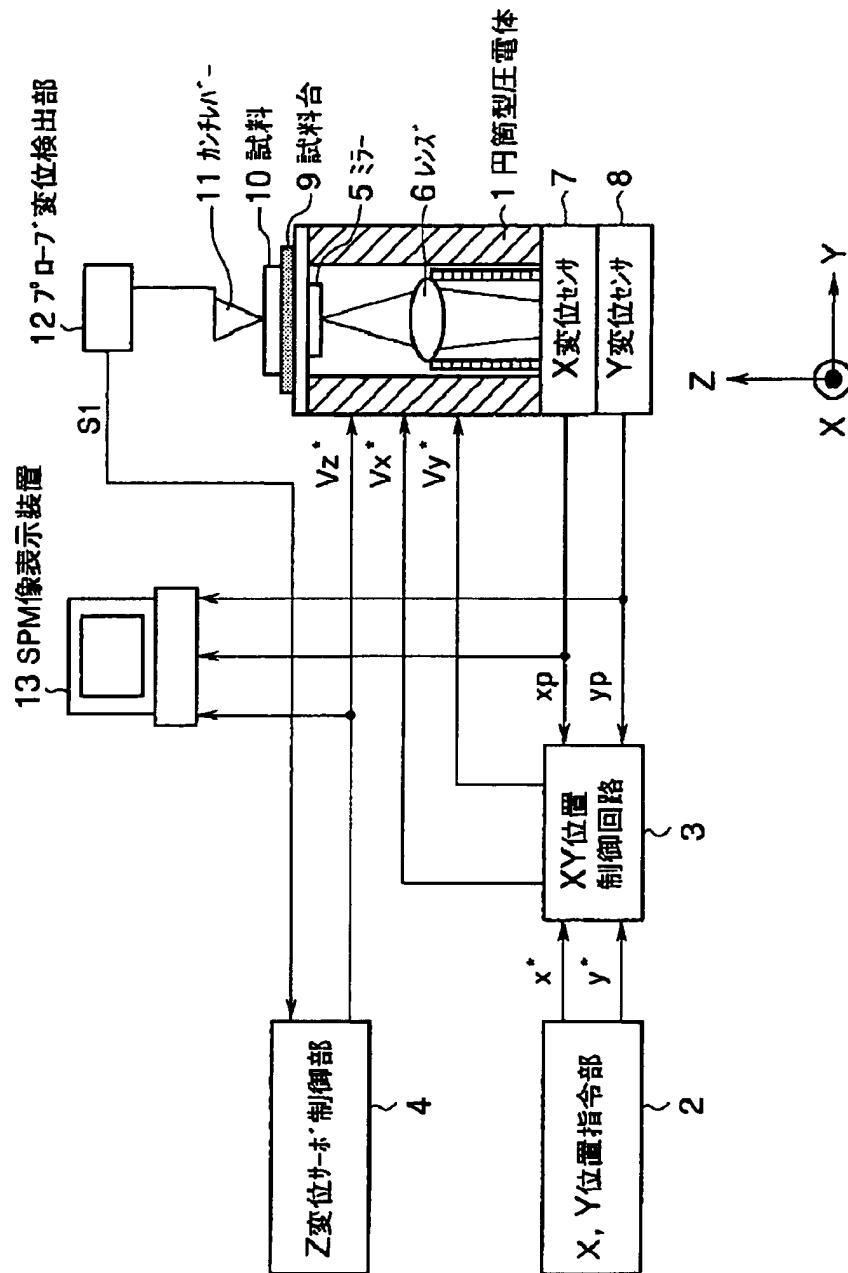
【図6】



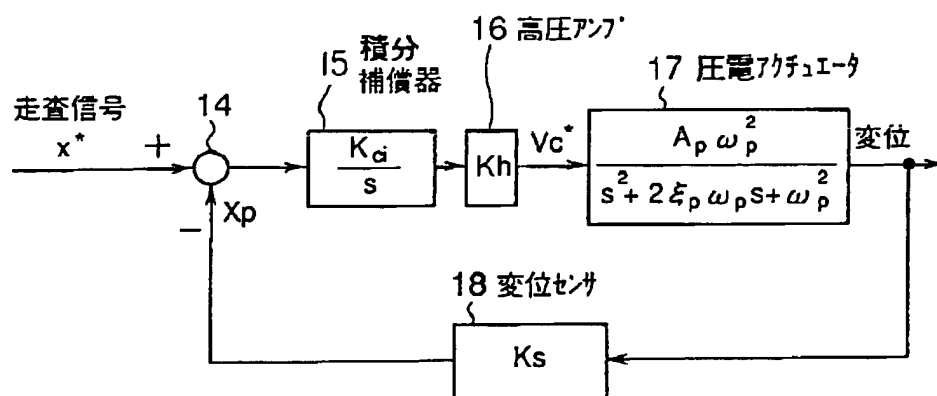
【図7】



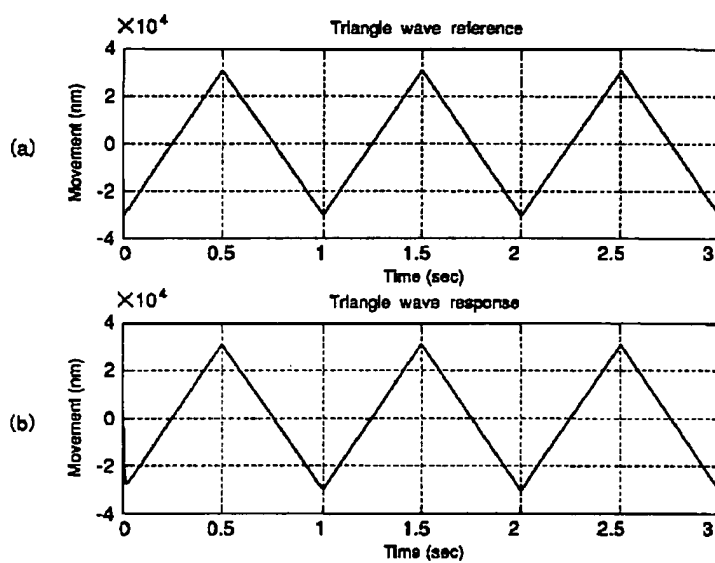
[図8]



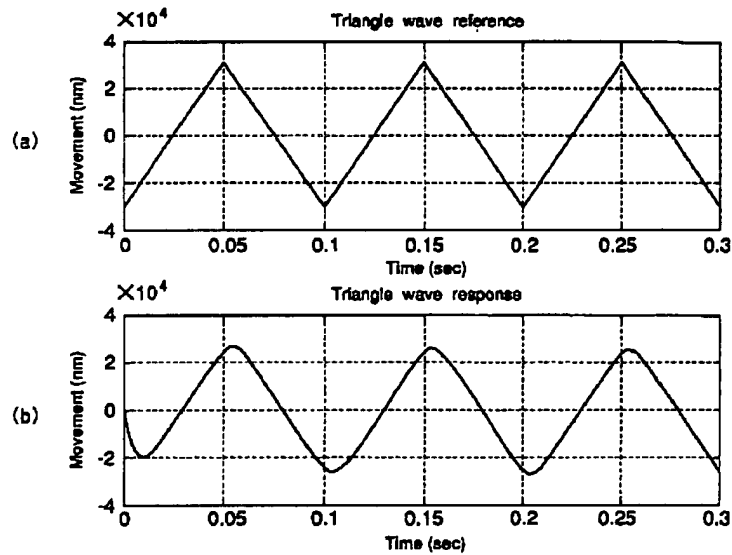
【図9】



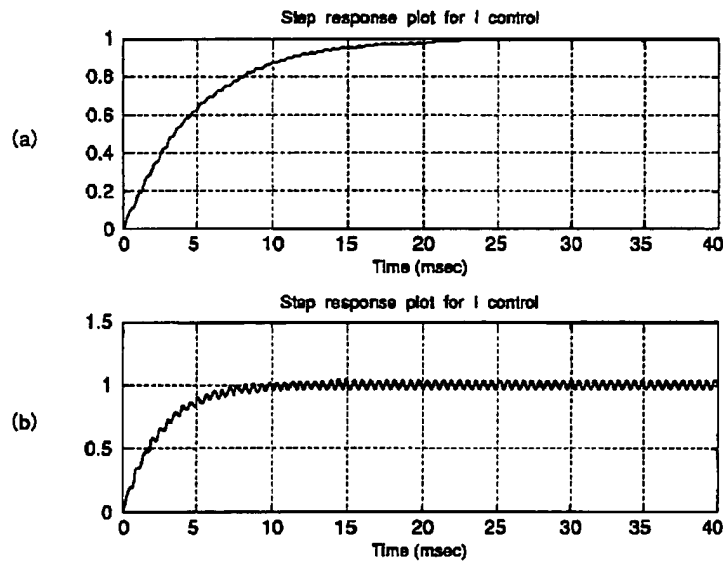
【図11】



【図12】



【図13】



【手続補正書】

【提出日】平成7年4月14日

【手続補正1】

【補正対象 類名】明細

【補正対象項目名】0030

【補正方法】変更

【補正内容】

【0030】

【作用】この発明にあつては、圧電体アクチュエータを用いた走査型プローブ顕微鏡のXY走査制御系にて、従来の走査制御系に圧電体の固有共振周波数 ω_p に於いて平坦な周波数特性を有するような伝達関数 $G_m(s)$ の規範モデル部によって、圧電アクチュエータの伝達関数 $G_p(s)$ の振動極点を移動させ、圧電アクチュエータの共振ピークを平坦な特性に従って抑制して、制御系の

速応性及び安定性を高める。これによって、減衰性の悪い機械振動系を安定化することができ、更にこれにより、位置制御ループのゲインを高く設定することができ、位置制御系の応答を速くすると共に精度を高めることができる。こうして、積分補償器を用いた位置制御系で走査速度を上げられないという問題を解決し、圧電体をXY2次元方向に高速移動することができる。

【手続補正2】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0040

【補正方法】変更

【補正内容】

【0040】ここで、従来の積分補償器を用いた位置制

$$G_c(s) \cdot G_p(s) = \frac{K_{ci} K_h K_s A_p \omega_p^2}{s(s^2 + 2\zeta_p \omega_p s + \omega_p^2)} \quad \dots (7)$$

ここで、 K_h は高圧アンプ16のゲイン、 K_s は変位センサ18のゲインを表している。

【手続補正4】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0047

※

$$G_c(s) = \frac{K_{ci}}{s} \quad \dots (9)$$

$$G_a(s) = K_{ap} + K_{ad}s \quad \dots (10)$$

$$G_p(s) = \frac{K_p \omega_p^2}{s^2 + 2\zeta_p \omega_p s + \omega_p^2} \quad \dots (11)$$

$$G_m(s) = \frac{K_m \omega_m^2}{s^2 + 2\zeta_m \omega_m s + \omega_m^2} \quad \dots (12)$$

ここで、 K_{ci} は積分補償器15の積分ゲイン、 K_{ap} 、 K_{ad} は適応機構部23の比例・微分ゲイン、 A_p 、 ζ_p 、 ω_p は圧電アクチュエータ17のパラメータ、 A_m 、 ζ_m 、 ω_m は規範モデル部21のパラメータを表している。

【手続補正5】

【補正対象書類名】明細書

★

$$G(s) = \frac{A_p \omega_p^2 K_{ci} K_h K_s [s^2 + (2\zeta_m \omega_m + A_m K_{ad} \omega_m^2)s + (\omega_m^2 + A_m K_{ap} \omega_m^2)]}{s(s^2 + 2\zeta_m \omega_m s + \omega_m^2) [s^2 + (2\zeta_p \omega_p + A_p K_{ad} \omega_p^2)s + (\omega_p^2 + A_p K_{ad} \omega_p^2)]} \quad \dots (13)$$

【手続補正6】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0063

【補正方法】変更

【補正内容】

【0063】尚、この発明による走査型プローブ顕微鏡の位置制御システムでは、規範モデル部としては単なるローパスフィルタ、例えば2次ローパスフィルタで構成し、適応機構部としては比例、微分制御というように非

*御と、この発明による位置制御の違いを説明する。図9に示されるような、従来の一般的な積分補償器を用いた位置制御の場合、制御系の開ループの伝達関数は次のようになる。

【手続補正3】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0041

【補正方法】変更

【補正内容】

【0041】

【数1】

※【補正方法】変更

【補正内容】

【0047】

【数2】

★【補正対象項目名】0050

【補正方法】変更

【補正内容】

【0050】

【数3】

常に簡単に構成することができ、特別な検出器を用いることがないため、従来マイクロコンピュータを用いて単なるフィードバックによる積分制御を行っていた位置制御システムに対しても、僅かなソフトウェアを追加するだけで容易に適用できるため、実用性の高いものである。

【手続補正7】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0070

【補正方法】変更

【補正内容】

【0070】上記（１）の構成によれば、減衰性の悪い機械振動系を安定化することができ、圧電体を２次元方向に高速走査することができる。上記（２）の構成によれば、単なるローパスフィルタで構成できるため、システム全体を簡単な構成で実現することができる。上記（３）の構成によれば、比例、微分制御というように非常に簡単に構成でき、特別な検出器も不要なため、マイクロコンピュータを用いて単なるフィードバックによる積分制御を行っていた位置制御システムに対しても、わ

ずかなソフトウェアを追加するだけで容易に適用できる。

【手続補正８】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】図１３

【補正方法】変更

【補正内容】

【図１３】（a）は従来の積分ゲイン $K_{c1}=250$ の時のステップ応答特性図、（b）は積分ゲイン K_{c1} が500の時のステップ応答特性図である。